12　フランク・ヘルツの実験
－原子のボーア模型の実験的立証－

電子を加速して原子に衝突させ，非弾性衝突による電子のエネルギー損失から，原子の内部エネルギーがとびとびの不連続な値をとることを確かめたフランク・ヘルツの実験を行う。この実験は，原子のボーア模型を直接的に立証するもので，また，量子論的な効果が電圧という巨視的な量として測定される興味ある実験でもある。

【使用実験機器】フランク・ヘルツ実験システム

§１ はじめに

原子は，正の電荷を持つ原子核とその周りを回る負の電荷の電子から成り立っている。原子のこのような構造が明らかになったのは，20世紀の初頭である。1906年，ラザフォードは薄い金属箔にα線を当てたときの散乱の研究を始め，彼の弟子であるガイガーとマースデンは，1909年，α粒子が金属箔によって２万回に１回の割合で後方に散乱されることを発見した。ラザフォードは，このα粒子の大角度散乱を金属箔の原子との１回の衝突(単一散乱の理論)によって説明し，10^{-13} cm程度の大きさの原子核の存在を結論した(1911,原子核の発見)。

ラザフォードが提案した原子の模型は，原子の中心にそのほとんど全部の質量を持つ正に帯電した原子核があり，その周りを負電荷の電子が回るというものである。この模型は，力学的には太陽の周りの惑星の運動のように電子の安定な軌道が許されるが，加速度運動により電磁波としてエネルギーを放出し，電磁理論とは矛盾する。すなわち，円形軌道を描いて運動する電子は，連続的にエネルギーを失い次第に原子核の方へらせん運動して落ち込み，安定な軌道をとることができないという困難を持っていた。

1913年，N.ボーアは，ラザフォードの原子模型にプランクのエネルギー量子とアインシュタインの光量子の考えを取り入れた原子模型を提案した。このボーアの原子模型は次の二つの仮説を基礎としている。

[仮説１] 原子は，連続的にあらゆる値のエネルギーを取りうるのではなく，原子に特有ないくつかのとびとびのエネルギーE_1，E_2，…だけをとることが許される。この状態では原子は光の放射を行わない。この状態を定常状態，この可能なエネルギーの値E_nをその原子のエネルギー準位と名づける。

[仮説２] 原子が光の放出や吸収を行うのは，原子が一つの定常状態から他の定常状態へ遷移するときである。このとき，放出または吸収される光の振動数νは，

$$h\nu = E_n - E_m \qquad \cdots (1)$$

の関係を満たす。ここで，E_mとE_nは遷移する定常状態のエネルギー準位，hはプランク定数である。

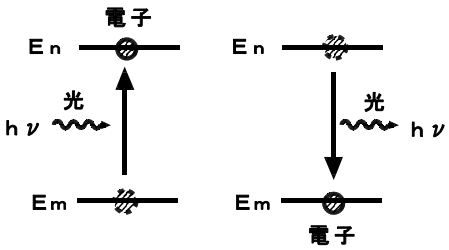


図１ 定常状態間の遷移

第１の仮説によると，原子を構成する電子が円形軌道を描いて加速度運動しても光を放出しないし，安定な定常状態をとることがことができる。第２の仮説によると，定常状態間の遷移にともなう光の振動数は，電子の周回運動の振動数とは何ら関係がない。これらの２つの仮説は，これまでに確立された力学や電磁気学の理論と鋭く矛盾し，原子を記述する現代物理学の新しい理論（量子力学）へと発展することになる。

このボーアの原子模型は，当時未解決であった原子の発光スペクトルの規則性を説明するものであった(*)。しかし，この模型の最も直接的な実験的証明は，1914年にフランクとヘルツが行ったＨｇ原子に電子を衝突させた実験である。この実験では，非弾性衝突による電子のエネルギー損失から，原子の内部エネルギーの不連続性を直接確かめられる。この実験は，量子論的な効果（離散的エネルー）が電圧という巨視的な量によって測定される極めて興味ある実験でもあり，ここでは，希ガス原子に対してこのフランク・ヘルツの実験を行う。

(*)このことについては，別の実験項目「13 原子スペクトルの観察と波長の測定」で取り扱う。

【参考】N.ボーアは，原子の構造とその放射に関する研究で，また，J.フランクとG.ヘルツは，原子と電子の衝突を支配する法則についての発見で，それぞれ 1922年，1925年 にノーベル賞を受賞した。なお，E.ラザフォードは，1908年に元素の崩壊および放射性物質の化学に関する研究で，M.プランクは，1918年にエネルギー量子の発見で，A.アインシュタインは，1921年に光電効果の発見で，それぞれノーベル賞を受賞している。

§２ フランク・ヘルツの実験

１ ボーア模型における電子の原子との非弾性衝突

あるエネルギーの電子が希薄な気体中に入射されたとする。ボーアの模型では，この気体原子はいくつかのとびとびのエネルギー準位をとることができるが，通常の温度では，最低のエネルギーE_1の状態（基底状態という）にあると考えられる。

もし，電子のエネルギーが気体原子の基底状態とその１つ上のエネルギーE_2の定常状態（第１励起状態という）とのエネルギー差E_2-E_1よりも小さいときは，電子は気体原子と衝突してもエネルギーが不足し，原子を第１励起状態に持ち上げることはできない。電子は原子と弾性衝突をするだけで，ほとんどエネルギーを失わない。しかし，電子が加速されてE_2-E_1のエネルギー以上になると，原子との衝突により原子を第１励起状態に持ち上げることができる。このとき，電子は原子との非弾性衝突により，E_2-E_1のエネルギーを失うことになる。一方，励起された原子は，光を放出して基底状態に遷移する。

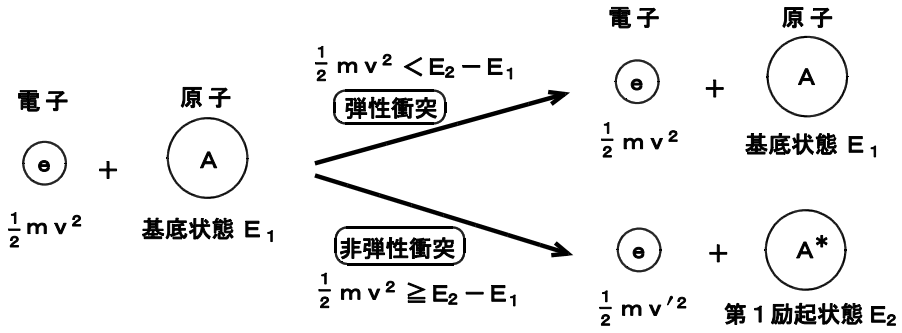


図２ ボーア模型での電子の原子との衝突

2 実験の原理

図３は，電子と原子との非弾性衝突のような現象が起こること示す実験の原理図である。管内には，希薄な気体原子が封入されている。

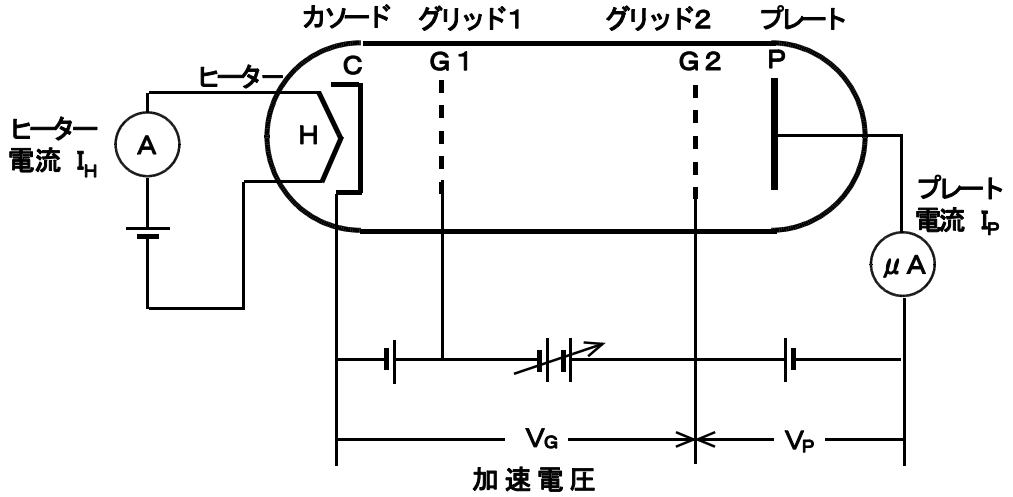


図３ フランク・ヘルツの実験の原理図

ヒーターHによってカソードCを加熱すると，カソードからは熱電子が放出される。カソードの前に置かれたグリッドG_1には正の電圧がかけられ，カソードC付近の空間電荷を消去し，熱電子の放出時の変動を除去している。熱電子は，CG_2間にかけられた加速電圧V_Gによって加速し，G_1G_2間で管内の気体原子と衝突する。一方，プレートPとグリッドG_2間には抑制電圧V_Pがかけられ，電子は減速する。このとき，グリッドG_2でこの電圧V_Pに打ち勝つだけの十分な運動エネルギー $mv_S^2/2$ （v_SはPに垂直な速度の成分）をもっていなければ，電子はプレートPに到達することができない。グリッドG_2は，原子との非弾性衝突によりエネルギーをほとんど失った電子を捕らえる役割をする。従って，加速電圧V_Gを上げて行ったとき，プレート電流I_P が減少すれば非弾性衝突が起こっていることがわかる。

3 フランクとヘルツの実験結果

フランクとヘルツは，（図３のグリッド１がない装置で）水銀蒸気に電子を衝突させた実験を行い，図４のような結果を得た[3]。 この図は，加速電圧V_Pを増加して行ったときプレート電流I_Pがどう変化したかを示すもので，V_G=4.1V，9.0V，13.9VのところでI_Pが極大になっている。

加速電圧V_G を０から増加していくと，はじめのうちは電子の運動エネルギーも小さく，原子と衝突してもこれを励起できなく，運動の方向を変えるだけである。衝突は弾性的で，電子はほとんどエネルギーを失うことなくプレートPに達し，I_Pは増加する。さらにV_Gを増加していくと，電子の運動エネルギーも高くなり，原子との衝突によってこれにエネ

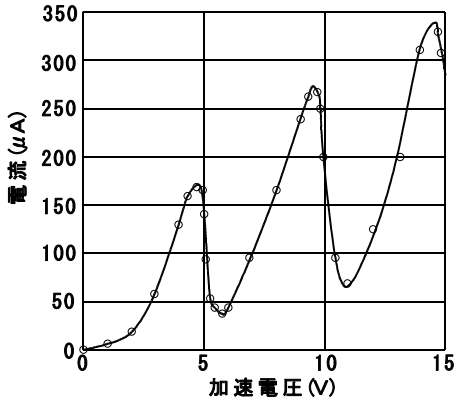


図４ フランク・ヘルツの実験

ルギーを与え励起する。この非弾性衝突により電子はエネルギーを失い，PG_2間にかけられた抑制電圧によってグリッドG_2に捕らえられてしまう。このときI_Pは急激に減少する。これが，V_G＝4.1Vでの最初の極大である。

さらにV_Gを増加すると，電子は再度加速されI_Pは再び増大しはじめるが，V_G＝9.0Vで再び急激な減少が起こり，その後I_Pは再び増大しV_G＝13.9Vでまた極大となる。これらの極大間の間隔は 4.9Vで一定である。最初の極大が 4.9Vにならないのは，カソードとグリッドG_2間で生じる接触電位差の影響であると考えられている(文献[3]，後の【参考】を参照)。第２の極大は電子が原子と２回の非弾性衝突を行ったことを示し，また，極大間の間隔がほぼ一定なのは，このような非弾性衝突の過程が繰り返されていることを意味する。

図４のV_G－I_P特性曲線が 4.9Vごとの極大を示すのは，エネルギーが 4.9ｅVの値より小さい電子は，水銀原子と衝突してもこれを励起できないことを示している。従って，水銀原子を励起するのに必要な最低のエネルギーは 4.9ｅVであると考えられる。このことは，ボーアが提案する原子の離散的なエネルギー準位の仮説を裏付けていることになる。水銀原子の実際のエネルギー準位は図５のようになり，4.9ｅV は水銀原子の第１励起状態のエネルギーでる。

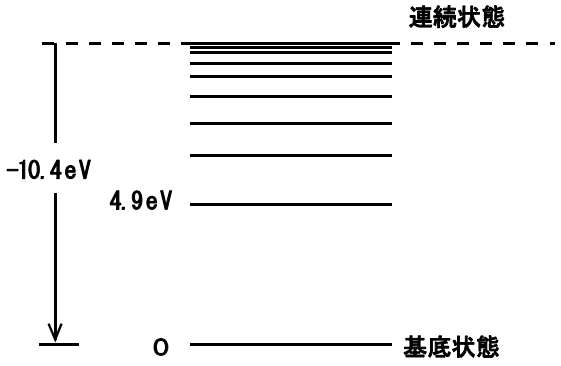
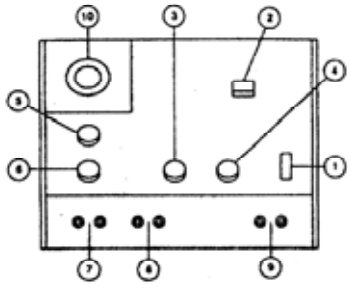


図５ 水銀原子のエネルギー準位

【注意】 エネルギー準位図は微細構造によりもっと複雑であるが，図５には概要を示した。以下のエネルギー準位図も同様である。

４ フランク・ヘルツ実験器



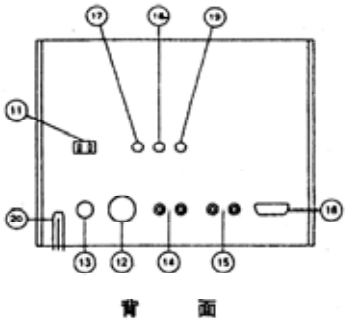


図６ 本体の説明

NO.	パネル表示	機　　能
1	POWER	スイッチを ON にすることにより電源が入ります。
2	Inert Gas/Hg	測定する真空管を選択するスイッチです。Ne,Ar,He の場合は Inert Gas，水銀の場合は Hg に設定します。
3	ACC.V.REG (Inert Gas)	加速電圧を可変するボリウムです。Ne,Ar,He の場合は Inert Gas，水銀の場合は Hg のボリウムを使用します。
4	(Hg)	
5	μA 0 ADJ	マイクロアンペア計の零点を調節するボリウムです。
6	H.CUR.ADJ	管球のヒータ電流を調整するボリウムです。
7	DC.V.METER	加速電圧測定用端子です。直流電圧計を接続します。
8	DC.μA.METER	PLATE 電流測定端子です。マイクロアンペア計を接続します。
9	DC.A.METER	管球のヒータ電流測定端子です。直流電流計を接続します。
10		真空管内部での励起発光のリングを観察するための窓です。
11	AC 100V	水銀管用電気炉の電源です。
12	To Hg Tube	水銀管接続端子です。
13	FUSE	ヒューズ 2A
14	G1	GRID1 電圧測定用端子です。直流電圧計を接続します。
15	G2	GRID2 電圧測定用端子です。直流電圧計を接続します。
16	MIOS I/O	外部インターフェイス接続用コネクターです。
17	G1 CONT. Inert Gas	GRID1 電圧を調節するボリウムです。（Inert Gas）用
18	Hg	〃　　（Hg）用
19	G2 CONT.	GRID2 電圧を調節するボリウムです。（Inert Gas）のみ有効
20		電源コード

§３ 実験

1 実験装置および器具

・フランク･ヘルツ実験器
・不活性ガス封入ＦＨ管(He管，Ne管，Ar管)
・直流電圧計(加速電圧測定用，100V)
・直流電流計(ヒーター電流測定用，5A)
・マイクロアンペア計(プレート電流測定用，100μA)
・デジタルマルチメーター(グリッド電圧調整用)
・コンピュータ計測システム
　コンピュータ(PC-98)，理科実験インターフェース MIOS-2，接続ケーブル，
　専用計測ソフト(FRANK.EXE)，専用データ処理ソフト(FHDATA.EXE)

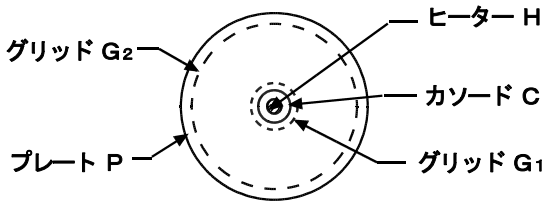


図７　ＦＨ管の構造(同心円筒型)

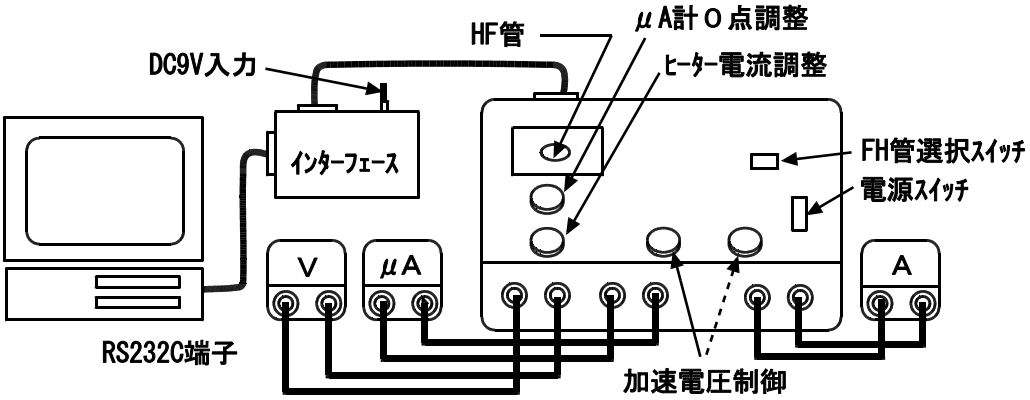


図８ フランク・ヘルツ実験システム

2 実験装置の配置と調整

この実験では，コンピュータ計測により加速電圧とプレート電流を測定する。（コンピュータ計測を利用しないときは，電圧計とマイクロアンペア計で直接読み取ることになる。）

① 実験装置を図８のように組み立てる。

【注意】《インターフェースへのＤＣ９Ｖ電源の供給について》
ＡＣアダプターを電源のコンセントに差し込み，その次に，ＡＣアダプターの出力プラグをインターフェース MIOS-2 の側面にあるＤＣ９Ｖ入力ジャックに差し込む。この順番を逆にしないこと。

② コンピュータの電源を入れ，計測システムを起動する。

③ ＦＨ管はＮｅ管があらかじめセットしてあるが，ＨｅやＡｒの実験のときはＦＨ管を取り替える。

④ 実験は希ガス(Ne,He,Ar)について行うので，ＦＨ管選択の押しボタンスイッチは出た状態(Inert Gas)にしておく。

⑤ 加速電圧制御つまみ(ACC.V.REG)，ヒーター電流調整つまみ(H.CUR.ADJ)は，左いっぱいに回しておく。

⑥ 実験器の背面にあるグリッドG_1,G_2の電圧調整を，表１参考にしてﾃﾞｼﾞﾀﾙﾏﾙﾁﾒｰﾀｰで行う。

⑦ μA計０点調整つまみ(μA0ADJ)で，マイクロアンペア計の零調整を行う。

表１　ＦＨ実験器の電圧・ヒーター電流の調整

	Ｎｅ	Ｈｅ	Ａｒ
CG_1間の電圧	1.5V～2.5V	3.5V～4.5V	1.0V～2.5V
PG_2間の電圧（V_P）	3.5V～6.0V	11.0～12.0V	1.5V～2.0V
ヒーター電流	700mA前後	640mA前後	630mA前後

⑧ ヒーター電流を，表１を参考に調整する。
⑨ 本体が安定するまで(約３分)待つ。

３ 実験の方法

(1)測定

※実験は，Ｎｅ，Ｈｅ，Ａｒについて，加速電圧V_Gを変えたときのプレート電流I_Pの変化を調べる。それぞれに対してグリッドG_1,G_2の電圧，ヒータ電流の適正値が異なるので，その都度ＦＨ管を取り替え，２の③から⑨の調整を行ってから以下の測定に入る。なお，Ｎｅ管のときは，管内部に励起発光リングを観察する。

① 加速電圧制御つまみ(ACC.V.REG) をゆっくり右に回して加速電圧を上げていったとき，マイクロアンペア計の針が振り切れない程度に大きく揺れるか確認する。このとき，マイクロアンペア計の針の振れが弱かったり振り切れた場合は，ヒータ電流を加減してカソードからの熱電子の放出を調整する。

【注意】 加速電圧を上げていくとき，放電が起きマイクロアンペア計が振り切れる場合は，加速電圧をすばやく零に戻し，グリッドG_1 の電圧を少し下げる。放電が続くと，ＨＦ管が破壊する恐れがある。また，ヒーター電流が高すぎても放電が起こりやすくなるので注意する。

② 測定を開始する前に，加速電圧制御つまみを左いっぱいに回し，電圧計の表示が０Ｖであることを確認する。

③ コンピュータのディスプレーには，図９のメニュー画面が表示されている。

・ヒーター電流「確認」をマウスでクリックすると，現在設定されているヒーター電流が表示される。「戻る」をクリックするとメニュー画面に戻る。

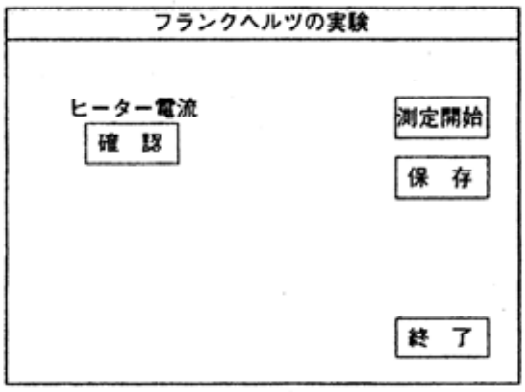


図９ 計測ソフトのメニュー画面

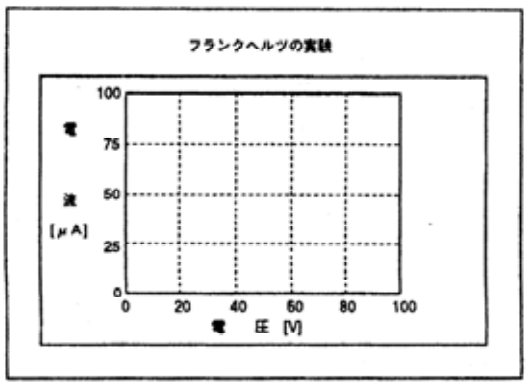


図10　測定画面

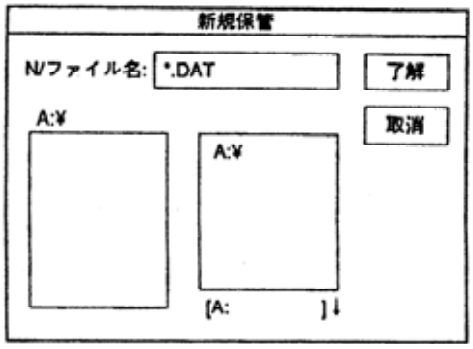


図11 保存管理画面

④ 測定を開始するときは，メニュー画面の「測定開始」をクリックする。図10のグラフ画面に切り替わり，「測定中」が画面右上に点滅する。

・加速電圧制御つまみ(ACC.V.REG) をゆっくり右に回して加速電圧を上げていく。プレート電流と加速電圧の変化がグラフに描かれる。

・電圧が 80Ｖを超えると測定が終了し，何かキーを押すとメニュー画面に戻る。

⑤ 計測データを保存するときは，メニュー画面の「保存」をクリックする。図11の保存管理画面が表示される。

・計測データにファイル名を付けて保存する。「了解」をクリックするとメニュー画面に戻る。保存しない場合は「取消」をクリックするとメニュー画面に戻る。

【注意】ファイル名は，英数半角８文字以内で，拡張子 .DAT を付ける。（********.DAT）

⑥ 測定を終了するときは，メニュー画面の「終了」をクリックする。プログラムが終了する。

【注意】再度プログラムを起動するときは，A>FRANK.EXE と入力する。プログラムが再起動する。

(2)データ分析

① A>FHDATA.EXE と入力するとデータ処理プログラムが起動し，図12のデータ読込画面が表示される。すでに保存されている計測データが一覧表示される。

・「読み込み」を選んで [ENTER]ｷｰを押す。次に，ファイル名を入力し [ENTER]ｷｰを押す。

・操作メニューが表示されるので，矢印キーで選択し [ENTER]ｷｰを押す。

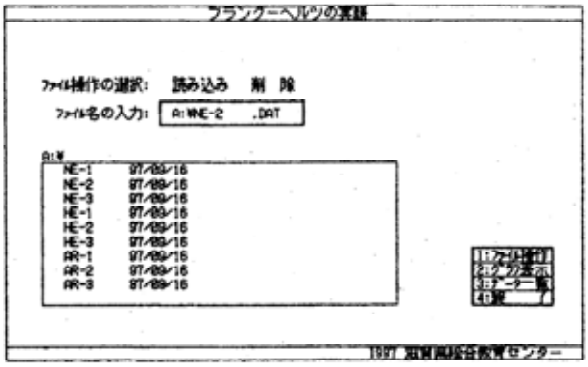


図12 データファイル読み込み画面

※《操作メニュー》

「1:ﾌｧｲﾙ操作」…ファイルの読み込みまたは消去。

「2:ｸﾞﾗﾌ表示」…データのグラフ表示（V_G－I_P特性曲線）。グラフ上でのデータ解析。グラフのハードコピー。

「3:ﾃﾞｰﾀ一覧」…データの一覧表示。データ解析。データ一覧表の印刷。

「4:終　　了」…プログラムの終了。

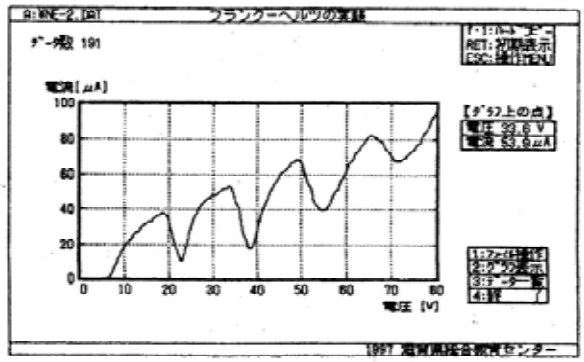


図13 グラフ表示画面

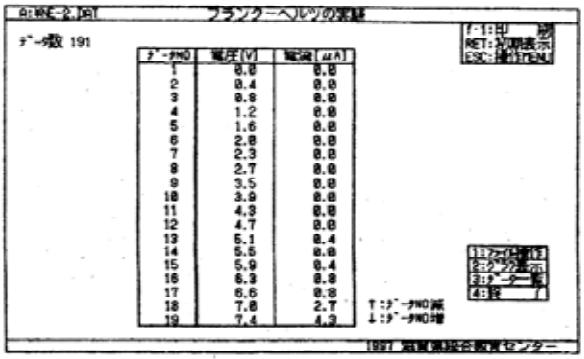


図14 データー覧表示画面

② 操作メニューから「2:ｸﾞﾗﾌ表示」を選択すると，図13のグラフ表示画面になる。
・矢印キー(→と←)により，加速電圧V_Gを増加したときのプレート電流I_Pの変化がグラフ上で追跡でき，同時にV_G，I_Pの値が表示される。I_Pが極大になるV_Gの値を読み取る。
・[f･1]ｷｰを押すと，グラフのハードコピーができる。
・[ESC]ｷｰを押すと，操作メニューが表示される。
③ 操作メニューから「3:ﾃﾞｰﾀ一覧」を選択すると，図14のデータ一覧表示画面になる。
・矢印キー(↑と↓)でデータNOを増減でき，加速電圧とプレート電流が調べられる。
※ [f･2]ｷｰにより，データNOを入力することにより任意のデータが調べられる。
※ [f･3]ｷｰにより，データ表示間隔が変更できる。
・[f･1]ｷｰを押すと，データを一覧表の形に印刷できる。
・[ESC]ｷｰを押すと，操作メニューが表示される。
④ 操作メニューから「4:終　　了」を選択すると，プログラムを終了できる。
【注意】再度プログラムを起動するときは，A>FHDATA.EXE と入力する。

§４ 実験結果と分析

1　Ｎｅ原子

・CG_1間の電圧　　1.5 Ｖ
PG_2間の電圧(V_P)　5.0 Ｖ
ヒータ電流　　680 ｍA

Ｎｅ原子に対するV_G-I_P特性曲線を図15に示す。また，プレート電流I_Pがピークになる加速電圧V_Gを表２に示す。

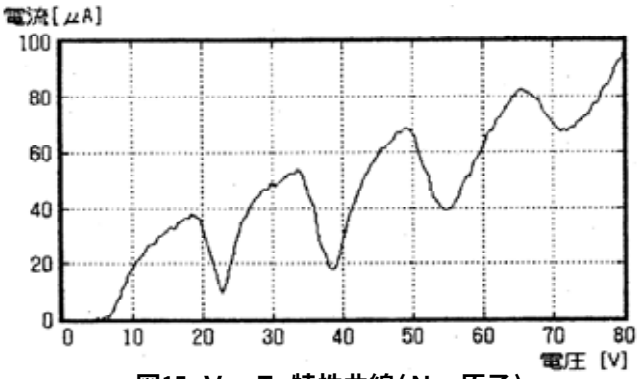


図15 V_G-I_P特性曲線(Ｎｅ原子)

表２ プレート電流のピーク時の加速電圧

Ｎｅ原子	加速電圧V_G [V]
第１ピーク（V_1）	18.4
第２ピーク（V_2）	33.6
第３ピーク（V_3）	49.2
第４ピーク（V_4）	65.6

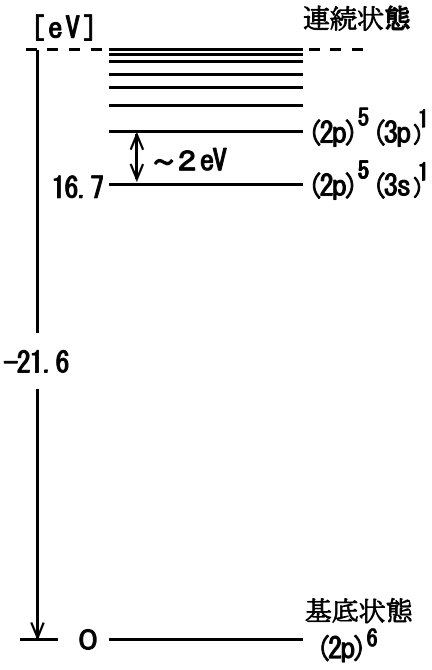


図16 Ｎｅ原子のエネルギー準位

各ピーク時の加速電圧の差は

$V_2 - V_1 = 33.6 - 18.4 = 15.2$ [V]

$V_3 - V_2 = 49.2 - 33.6 = 15.6$ [V]

$V_4 - V_3 = 65.6 - 49.2 = 16.4$ [V]

となり，平均は15.7Vである。従って，約16Vの間隔でピークが繰り返されることがわかる。

【注意】《実験値の精度について》

この計測システムではの８ビットのＡＤコンバータを使用しているため，分解能は計測量のフルスケールの 1/256 となる。従って，加速電圧V_Gの分解能は 0.3V～0.4V，プレート電流I_Pの分解能は約0.4Vとなる。

Ｎｅ原子の基底状態は，ｎ＝１，２の殻が閉殻の状態で $(1s)^2(2s)^2(2p)^6$ の電子配置を持つ。［簡単のために，図16では$(1s)^2(2s)^2$を省略して$(2p)^6$ で表している］。励起状態には，２ｐ軌道の電子が１個，３ｓ軌道に励起された状態（図16では$(2p)^5(3s)^1$）が 16.7ｅＶ付近にある。実験で得られた臨界電圧16Vは，電子がＮｅ原子と衝突して，この状態に原子を励起したものと考えることができる。

発光リングは非弾性衝突のたびに数の増加が観察される。

＊実験機器の製作者（島津理化器械(株)）によると、発光リングの発光メカニズムは、現在のところ明らかでないとのことである。

2　Ｈｅ原子

・CG_1間の電圧　4.0 V

PG_2間の電圧(V_P)　12.0 V

ヒータ電流　620 mA

Ｈｅ原子に対するV_G-I_P特性曲線を図17に示す。また，プレート電流I_Pがピークになる加速電圧V_Gを表３に示す。

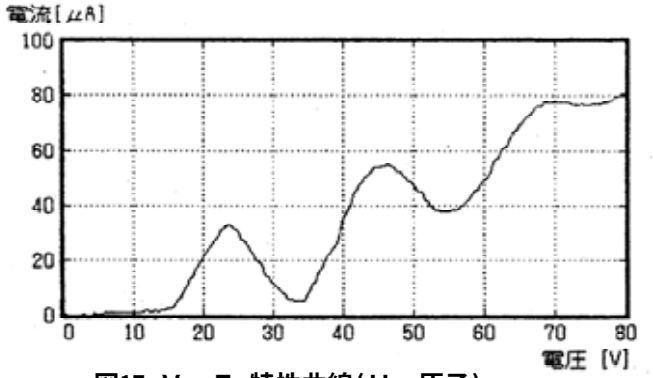


図17　V_G-I_P特性曲線(Ｈｅ原子)

表３　プレート電流のピーク時の加速電圧

Ｈｅ原子	加速電圧V_G [V]
第１ピーク（V_1）	23.8
第２ピーク（V_2）	46.5
第３ピーク（V_3）	70.3

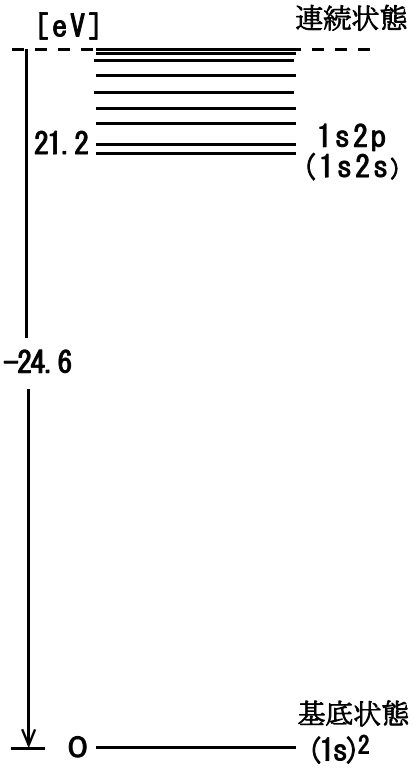


図18　Ｈｅ原子のエネルギー準位

各ピーク時の加速電圧の差は

$V_2 - V_1 = 46.5 - 23.8 = 22.7$ [V]

$V_3 - V_2 = 70.3 - 46.5 = 23.8$ [V]

となり，平均は23.3Vである。従って，約23Vの間隔でピークが繰り返されることがわかる。

Ｈｅ原子の基底状態は，ｎ＝１の殻が閉殻の状態で$(1s)^2$の電子配置を持つ。イオン化エネルギーが 24.6ｅＶで他のどの元素よりも大きい。Ｈｅ原子を励起するのも，他の元素に比べて大きなエネルギーが必要で，そのため，電子の加速電圧も高くなる。基底状態から励起することができるエネルギー準位は，21.2ｅＶのところに電子配置 1s2p の状態がある。実験で得られた臨界電圧23Vは，電子が Ｈｅ原子と衝突し，この状態に原子を励起したものと考えられる。

３ Ａｒ原子

・CG_1間の電圧　1.5 V

PG_2間の電圧(V_P)　1.5 V

ヒータ電流　580 mA

Ａｒ原子に対するV_G-I_P特性曲線を図19に示す。また，プレート電流I_Pがピークになる加速電圧V_Gを表４に示す。

表４ プレート電流のピーク時の加速電圧

Ａｒ原子	加速電圧V_G [V]
第１ピーク（V_1）	20.7
第２ピーク（V_2）	31.6
第３ピーク（V_3）	42.2
第４ピーク（V_4）	53.3
第５ピーク（V_5）	65.6
第６ピーク（V_6）	77.7

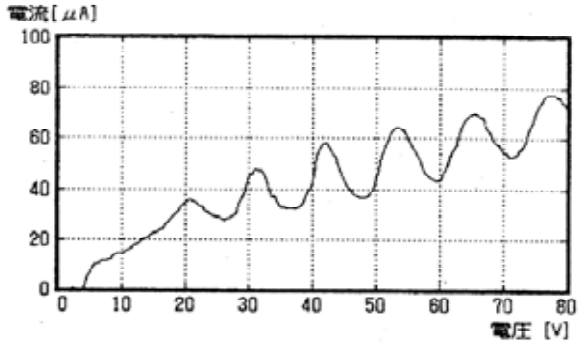


図19 V_G-I_P特性曲線(Ａｒ原子)

各ピーク時の加速電圧の差は

$V_2 - V_1 = 31.6 - 20.7 = 10.9$ [V]

$V_3 - V_2 = 42.2 - 31.6 = 10.6$ [V]

$V_4 - V_3 = 53.3 - 42.2 = 11.1$ [V]

$V_5 - V_4 = 65.6 - 53.3 = 12.3$ [V]

$V_6 - V_5 = 77.7 - 65.6 = 12.1$ [V]

となり，平均は11.4Vである。従って，約11Vの間隔でピークが繰り返されることがわかる。

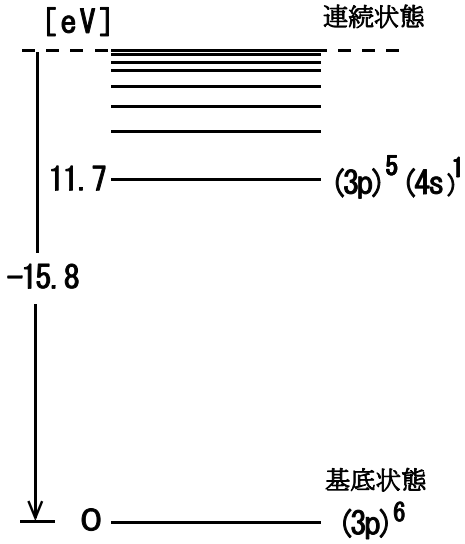


図20 Ａｒ原子のエネルギー準位

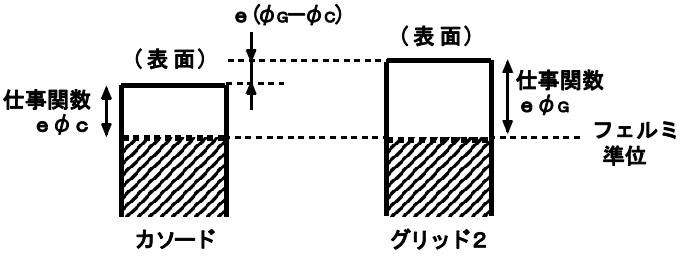
Ａｒ原子の基底状態は，ｎ＝１，２，３の殻が閉殻の状態で $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6$ の電子配置を持つ。［簡単のために，図20では 1s2s2p3s の配位は省略して$(3p)^6$で表している］。 励起状態には，３ｐ軌道の電子が１個，４ｓ軌道に励起された状態 (図20では$(3p)^5(4s)^1$)が 11.7ｅＶ付近にある。実験で得られた臨界電圧約11Vは，電子がＡｒ原子と衝突してこの状態に原子を励起したものと考えられる。

【参考】《加速電圧と接触電位差》

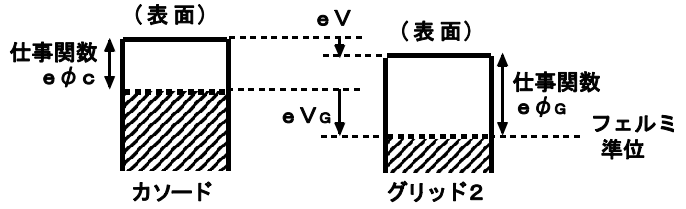
カソードからの熱電子を加速する電圧Ｖは，カソードＣとグリッド$Ｇ_2$ の仕事関数の差に起因する接触電位差のため，図21に示すように，一般にはこれらの極板間にかけられた印加電圧$Ｖ_Ｇ$とは異なる。カソードＣとグリッド$Ｇ_2$の仕事関数を，それぞれ $Ｗ_Ｃ＝ｅφ_Ｃ$，$Ｗ_Ｇ＝ｅφ_Ｇ$とすると，両者の差は，$ΔＷ＝Ｗ_Ｇ－Ｗ_Ｃ＝ｅ(φ_Ｇ－φ_Ｃ)$ となる。ここで，$(φ_Ｇ－φ_Ｃ)$を接触電位差という。一般に，$φ_Ｇ＞φ_Ｃ$で，普通，$(φ_Ｇ－φ_Ｃ)$は１～５Ｖの値になる。

今，仮にカソードとグリッド$Ｇ_2$を導線で結び$Ｖ_Ｇ＝０$とすると，極板間の空間には接触電位差による電位の勾配ができる（図21(a)）。電子のポテンシャルエネルギーは，グリッド$Ｇ_2$の方が高くなり，電子はカソードに追い返される向きに電気力をうける。

次に，カソードに対しグリッド$Ｇ_2$に正の電圧$Ｖ_Ｇ$をかけると，電子の電荷は負なので，フェルミ準位はグリッド$Ｇ_2$の方が$ｅＶ_Ｇ$だけ下げられる(図21(ｂ))。このとき極板間の空間に働く電圧をＶとすると，　$ｅＶ＝ｅＶ_Ｇ－ΔＷ$
すなわち　$Ｖ＝Ｖ_Ｇ－(φ_Ｇ－φ_Ｃ)$
となり，印加電圧$Ｖ_Ｇ$より接触電位差$(φ_Ｇ－φ_Ｃ)$の分だけ低くなる。逆に，$Ｖ_Ｇ＝Ｖ＋(φ_Ｇ－φ_Ｃ)$ であるから，印加電圧$Ｖ_Ｇ$を接触電位差$(φ_Ｇ－φ_Ｃ)$以上にかけたとき，初めて熱電子はグリッド$Ｇ_2$の方に加速されることになる。このような理由で，$Ｖ_Ｇ$-$Ｉ_Ｐ$特性曲線で最初のピークが起こる電圧は，ピーク間の電圧より高くなる。



（ａ）カソードとグリッド２を導線で結び$Ｖ_Ｇ$＝０としたとき



（ｂ）カソードに対してグリッド２に電圧$Ｖ_Ｇ$をかけたとき
（図中のＶが、実際に電極間の空間にかかる加速電圧となる）

図21 加速電圧と接触電位差

【参考文献】

[1] ｽﾃｲｰﾌﾞﾝ・ﾜｲﾝﾊﾞｰｸﾞ著，本間三郎 訳「電子と原子核の発見」(1986，日経ｻｲｴﾝｽ社)
[2] 朝永振一郎 著「量子力学Ⅰ」(1969，みすず書房)
[3] E.ｼｭﾎﾟﾙｽｷｰ 著「原子物理学」(1985，東京図書)
[4]「ﾌﾗﾝｸ・ﾍﾙﾂ実験器」，「ﾌﾗﾝｸﾍﾙﾂの実験ｼｽﾃﾑ」 取扱説明書（島津理化器械(株)）
[5]「物理学辞典」(倍風館 1894)